DOI:10.11931/guihaia.gxzw201812018

山东省植被 NPP 时空分布特征及驱动因素分析

骆艳，张松林*
（西北师范大学，兰州 730070）

摘要：为了解区域生态系统植被生产力的分布规律及其变化对区域生态调控的作用，本文基于 MOD17A3 的年 *NPP* 数据，采用一元线性回归分析法和 Pearson 相关系数法等方法，分析了 2000—2014 年山东省植被 *NPP* 的时空格局变化特征及其气候、人为等因素对其的影响。结果表明：（1）2000—2014 年，山东省植被 *NPP* 总体呈上升趋势，年均值为 442 g C ·m^{-2} ·a^{-1}，年总量平均值为 63.16 T g C。山东省植被 *NPP* 空间分布具有明显的分异特征，其中年均 *NPP* 300 ~ 400 g C ·m^{-2} ·a^{-1} 的面积最大，占总面积的 52.28%，分布于山东省西部的绝大部分区域。（2）山东省植被 *NPP* 年增加速率平均值为 3.29 g C ·m^{-2} ·a^{-1}，增加区域占山东省植被总面积的 92.63%。其中，极显著增加区域占山东省总面积的 16.56%，主要分布在烟台市、青岛市、日照市、临沂市、潍坊市、东营市和滨州市；显著减少和极显著减少的区域占山东省总面积的 1.33%，零星分布在山东省东南部和北部黄河三角洲地区。（3）植被 *NPP* 受气候变化和人类活动等因素的共同影响，气候因素中降雨的影响最大，城市化随着人类活动的频繁逐渐成为植被 *NPP* 变化的重要驱动力。

关键词：*NPP*，年际变化，驱动因子，山东省，土地利用类型
中图分类号：Q948　　　　**文献标识码：** A

Temporal-spatial variation characteristics and driving factors of vegetation NPP in Shandong Province

LUO Yan，ZHANG Songlin*
（*Northwest Normal University*, Lanzhou 730070, China）

Abstract： In order to understand the distribution law of regional ecosystem vegetation productivity and its effect on regional ecological regulation, based on the annual net primary productivity (*NPP*) data of MOD17A3, the method of univariate linear regression analysis and Pearson correlation coefficient, etc., were used to analyze spatial and temporal patterns of vegetation *NPP* ecosystem in Shandong Province during the past 15 years from 2000 to 2014 and climate and human factors. The results showed that: (1) the average *NPP* of vegetation in Shandong Province from 2000 to 2014 was 442 g C ·m^{-2} ·a^{-1}, and the total average annual *NPP* was 63.16 T g C. The vegetation *NPP* of Shandong Province showed obvious spatial differentiation characteristics, among which, the vegetation area of the average *NPP* 300 ~ 400 g C ·m^{-2} ·a^{-1} was the largest. (2) the average annual growth rate of *NPP* in Shandong province was 3.29 g C ·m^{-2} ·a^{-1}, accounting for 92.63% of the total vegetation area in Shandong province. Among them, the area of extremely significant increase accounted for 16.56% of the total area of Shandong province, mainly distributed in Yantai, Qingdao, Rizhao, Linyi, Weifang, Dongying and

---

基金项目：国家自然科学基金（51068025）；甘肃省自然科学研究基金（1308RJZA302）；甘肃省油气资源研究重点实验室开放课题基金（SZDKFJJ20150606）[Supported by the National Natural Science Foundation of China（51068025）; Natural Science Research Fund of Gansu Province（1308RJZA302）; Open Fund of Key Laboratory of Oil and Gas Resources Research of Gansu Province（SZDKFJJ20150606）]。

作者简介：骆艳(1993 -)，女，甘肃金昌人，硕士研究生，主要从事环境化学方面研究，（E-mail）luoyana221@163.com。
***通信作者：**张松林，博士，教授，主要从事环境化学和固废资源化方面的研究，（E-mail）zhangsonling65@163.com。

Binzhou cities; The regions with significant decrease and extremely significant decrease accounted for 1.33% of the total area of Shandong province, and were scattered in the southeast of Shandong province and the northern Yellow River delta region. (3) the vegetation *NPP* by the combined effect of factors such as climate change and human activities. The influence of rainfall on climate factors is biggest. Urbanization gradually becomes an important driving force for vegetation *NPP* changes with the frequent human activities.

Key words: net primary productivity，inter-annual variability，driving factors，Shandong Province，land use type

植被净初级生产力（*NPP*，Net Primary Productivity）指绿色植物在单位时间和单位面积上所积累的有机干物质量（Field et al.，1998），体现陆地生态系统当时的状况，代表绿色植物通过光合作用固定大气 CO_2 的能力（张杰和潘晓玲，2010）。植被 *NPP* 在全球的碳平衡中具有重要的作用，对气候变化的响应研究是科学研究的焦点之一（Cramer et al.，1999）。近年来，多位学者对我国植被 *NPP* 与气候因子的关系进行了研究。李登科等（2018）基于 MOD17A3 数据对中国 2000—2015 年陆地植被 *NPP* 进行研究发现，大部分地区变化趋势不明显，呈现显著增加趋势和显著减少趋势的面积相对较少。仲晓春等（2016）利用 CASA 模型反演了全国植被 *NPP*，认为近十年来中国植被 *NPP* 的空间分布总体北低南高，由西北向东南增加，地域性明显，且降雨量和温度为影响植被 *NPP* 的主要因素。然而，在全国尺度上，植被 *NPP* 受不同植被类型和气候变化的影响表现出较大的时空异质性，因此植被 *NPP* 在区域尺度上的时空变化的驱动机制需要进一步研究。陈瑛瑛等（2015）分析了我国南方近 12 年植被净初级生产力，认为大部分地区植被 *NPP* 与温度呈正相关、与降雨呈负相关，受气候因素影响大。王志红等（2018）对贵州植被 *NPP* 分布特点与地形变化的关系进行研究，发现海拔高度不是主要的影响因子，地形起伏度与 *NPP* 显著相关，且地形起伏越大的区域 *NPP* 值越高。

山东省植被种类繁多，并且作为中国的农业大省，是小麦、玉米和花生等作物的主要生长区。然而随着快速的经济发展，人类活动的干扰逐渐加强，使得土地覆盖面积发生改变，土地利用类型发生转移，导致了植被及水土资源的流失，研究 *NPP* 的时空变化可以有效地反映其生态系统的动态和健康状况，对评价山东省生态环境起着重要作用。区域尺度的植被 *NPP* 与气候变化以及相关影响因素的研究对生态系统的稳定和碳循环的调节具有重要的意义，高志强等（2004）研究了中国北方因土地利用和覆盖方式的改变对于 *NPP* 的影响。目前针对山东省植被 *NPP* 的相关研究较少，本文利用 MODIS 数据和 GIS 相关技术分析山东植被 *NPP* 的时空分布特征及其气候、人为等因素对其的影响，为山东省的植被保护、碳循环评估和自然资源的有效合理利用提供科学依据。

1 研究区概况

山东省地理坐标 114°47′ E—122°43′ E，34°22′ N—38°27′ N，位于我国东部沿海地区和黄河下游，东临黄海和渤海，陆地总面积 15.8 万 km^2，总人口 10 006 万人（2017 年），共 17 个地级市。中部为隆起的山地，北部和西部为平坦的黄河冲积平原，东部与南部为起伏的丘陵区。暖温带季风气候，受海洋季风的影响较大，四季分明，雨量集中，夏季雨热同期，冬季晴朗干燥，平均气温 11 ~ 14 ℃；年均降水量 500 ~ 1 100 mm，从东南沿海向西北内陆递减。

2 数据来源与处理

本文使用的 2000—2014 年的 MOD17A3 *NPP* 数据来自美国 NASA EOS/MODIS 网站（http://lpdaac.usgs.gov），空间分辨率为 1 km×1 km。该数据是利用 BIOME—BGC 模型与光能利用模型建立起全球 *NPP* 估算模型，从而得到陆地生态系统 *NPP*。目前，该数据在全国不同地区植被净初级生产力的时空特征和碳循环研究中广泛应用（国志兴等，2009；Rasmus et al.，2006；位贺杰等，2014）。本文将为期 15 年的 MODIS 数据在 MRT 工具中进行处理，投影转换为 Albers Equal Area。

本研究使用的气象数据来自中国气象科学数据共享服务网（http://cdc.cma.gov.cn）的山东省境内及周边的 33 个气象站点提供的年均气温和年降水量数据。结合 1 000 m 的 DEM 数据和 33 个气象站点的经纬

度信息，利用 Aunsplin 气象数据插值软件对气象数据进行插值处理，获取的栅格分辨率为 1 km×1 km。Aunsplin 软件对气象数据插值去除了高程对温度和降水的影响，得到的气象栅格数据更加可靠(程春晓等，2014)。

土地利用类型数据为 2000 年、2005 年和 2010 年山东省遥感监测数据，来源于中国科学院资源环境科学数据中心，分辨率为 1 km。将土地利用类型数据归并分类为林地、耕地、水域、草地、城镇与未利用地。

2.1 *NPP* 变化趋势分析

山东省 2000—2014 年的平均 *NPP* 空间分布图，计算式为：

$$\overline{NPP} = \frac{\sum_{i=1}^{n} NPP_i}{n} \quad (1)$$

式中，$\overline{NPP}$为山东省 2000—2014 年累计 15 年的 *NPP* 平均值；*n* 为研究时间段的年数，取值 15；i为年序号，即为 2000，2001，…，2014 年；NPP_i为第i年的山东省 *NPP* 值。

基于像元的 *NPP* 线性倾向采用一元线性回归分析法，消除了异常因素对 *NPP* 变化趋势的影响（潘竟虎和李真，2015)。本文对 *NPP* 年际变化趋势的计算公式为：

$$Slope = \frac{n\times\sum_{i=1}^{n}(i\times NPP_i)-\sum_{i=1}^{n} i\sum_{i=1}^{n} NPP_i}{n\times\sum_{i=1}^{n} i^2-\sum_{i=1}^{n} i\sum_{i=1}^{n} i} \quad (2)$$

式中，$Slope$为线性倾向值，单位为 g C ·m^{-2} ·a^{-1}，代表了 *NPP* 的变化倾向程度。当$Slope$ > 0，*NPP* 随着时间增加呈上升趋势；当$Slope$ = 0，*NPP* 随着时间增加不变；$Slope$ < 0，*NPP* 随着时间增加呈下降趋势。*n* 为研究时间段的年数，取值 15；i为年序号，即为 2000，2001，…，2014 年；NPP_i为第i年的 *NPP* 值。

回归模型的显著性大小采用 *F* 检验，计算式为：

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{n}(\widehat{NPP}_i - \overline{NPP})^2}{\sum_{i=1}^{n}(NPP_i-\widehat{NPP}_i)^2}(n-2) \quad (3)$$

式中，NPP_i为第i年的 *NPP* 值；$\overline{NPP}$为累计 15 年 *NPP* 的平均值；$\widehat{NPP}_i$为第i年的 *NPP* 回归值。

根据 *F* 检验查询结果，将山东省 *NPP* 的变化趋势划分为极显著减少、显著减少、变化不明显（不显著增加或者减少)、显著增加和极显著增加五个类型。

2.2 相关性分析

基于像元的植被 *NPP* 与气候因子年均气温和年降水量的相关性分析采用 Pearson 相关系数法。之后对 *NPP* 与气温或降水的相关系数进一步计算，得到 *NPP* 与气温和降水的偏相关系数。相关系数以及偏相关系数的计算方法如式（4）和式（5）所示：

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n}[(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2\times\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}} \quad (4)$$

式中，R_{xy}为两变量 *NPP* 与气温或降水的相关系数。

$$R_{xy,z} = \frac{R_{xy}-R_{xz}R_{yz}}{\sqrt{(1-R_{xz}^2)\times(1-R_{yz}^2)}} \quad (5)$$

式中，$R_{xy,z}$是气温或降水（*z*）固定后另一气候因子与 *NPP* 的偏相关系数。

偏相关性的显著性检验采用 *t* 检验，计算式为：

$$t = \sqrt{n-m-1}\frac{R_{xy,z}}{\sqrt{1-R_{xy,z}^2}} \quad (6)$$

式中，*n* 为年份，*m* 是自变量个数。

各个要素之间的相互影响较为复杂，仅研究各要素间的相关性和偏相关性不能反映出他们之间的关系，复相关性可以进一步反映各要素间的综合影响，因此基于相关系数和偏相关系数计算复相关系数，公式如下：

$$R_{x,yz} = \sqrt{1-(1-R_{xy}^2)(1-R_{xz,y}^2)}$$

式中，$R_{x,yz}$为因变量 x 与自变量 y、z 的复相关系数，$R_{xz,y}$为偏相关系数，R_{xy}为 x 与 y 的相关系数。

复相关系数的显著性检验（F 检验）公式为:

$$F=\frac{R_{x,yz}\times R_{x,yz}}{1-R_{x,yz}\times R_{x,yz}}\times\frac{n-k-1}{k}$$

式中，n 为年份，k 是自变量个数。

2.3 气候因子与非气候因子的驱动力分类

参考国内学者的研究（高志强等，2004；何奕萱等，2018）和植被覆盖变化驱动分区原则（陈云浩等，2001），并结合研究区的情况对其进行适当调整，把影响 *NPP* 变化的驱动力分为五类（表 1）。

表 1 *NPP* 变化驱动力分区

Table 1 Classification criteria for *NPP* change driving force

变化驱动因子 Changes driving factors			分区准则 Rules *R*1	分区准则 Rules *R*2	分区准则 Rules *R*3
气候因子 Climate factors	气温降水强驱动	$[T+P]^+$	$\|t\|>t_{0.01}$	$\|t\|>t_{0.01}$	$F>F_{0.05}$
	气温降水弱驱动	$[T+P]^-$	$\|t\|\leq t_{0.01}$	$\|t\|\leq t_{0.01}$	$F>F_{0.05}$
	气温为主要驱动	T		$\|t\|>t_{0.01}$	$F>F_{0.05}$
	降水为主要驱动	P	$\|t\|>t_{0.01}$		$F>F_{0.05}$
非气候因子 Non-climate factors	非气候因子驱动	NC			$F\leq F_{0.05}$

注：*R*1 为忽略温度影响的偏相关性显著性检验；*R*2 为忽略降水影响的偏相关性显著性检验；*R*3 为复相关的显著性检验

Note：*R*1 is a partial correlation significance test that ignores temperature effects；*R*2 is a partial correlation significance test that ignores precipitation effects；*R*3 is a significant test of complex correlation

驱动力分析的统计检验方法如下：

对于 *R*1 和 *R*2 偏相关性的显著性检验采用 t 检验，当显著性水平设定为 0.01 时，t 取值为 2.681，当$|t|>$ 2.681 时，显示显著。对于 *R*3 复相关性的显著性检验采用 F 检验，当显著性水平设定为 0.05 时，F 取值为 3.885，当 $F>$ 3.885 时，显示显著。

非气候因子中土地及 *NPP* 转移矩阵的获得方法为：

将 2000、2005 和 2010 年三期土地利用数据在 GIS 软件中分类得到林地、耕地、水域、草地、城镇与未利用地六种土地利用类型，并赋予不同的值。把 2000 年和 2005 年两期土地利用数据相减，得到 2000—2005 年不同类型土地向另外五种土地类型转移的栅格图，其中每一种转移方法都有特定的值，2005—2010 年的方法同上，最后进行统计，得到土地转移矩阵。利用得到的土地利用类型转移数据分别提取出 2000、2005 和 2010 年的 *NPP* 数据，进行计算，得到 2000—2005 年和 2005—2010 年各土地类型转移的 *NPP* 量，统计得到 *NPP* 转移矩阵。

3 结果与分析

3.1 植被 *NPP* 的空间分布特征

山东省 2000—2014 年植被的平均 *NPP* 为 442 g C ·m^{-2} ·a^{-1}。由图 1 可以看出，山东省植被 *NPP* 平均值为 0 ~ 200 g C ·m^{-2} ·a^{-1} 的区域很少，故合并为一组；200 ~ 400 g C ·m^{-2} ·a^{-1} 的区域分布较集中，以 50 g C ·m^{-2} ·a^{-1} 为级差可有效区分其空间分布；400 g C ·m^{-2} ·a^{-1} 以上的分布较离散，以 100 g C ·m^{-2} ·a^{-1} 为级差即可有效区分其空间分布。山东省植被 *NPP* 年均值空间分布呈现明显的分异特征，其中，平均 *NPP* 低于 300 g C ·m^{-2} ·a^{-1} 的区域集中分布于济南市、淄博市、莱芜市、泰安市和济宁市，在德州市西南部、滨州市和东营市北部地区也有分布，占总面积的 11.72%；*NPP* 平均值 300 ~ 400 g C ·m^{-2} ·a^{-1} 的分布于山东省西部的绝大部份区域，占总面积的一半以上（52.28%）；*NPP* 年均值 400 ~ 500 g C ·m^{-2} ·a^{-1} 的多数分布

于潍坊市、日照市和临沂市，少数分布于菏泽市、枣庄市南部、以及烟台市和青岛市的西部，占总面积的13.89%；*NPP* 平均值大于 500 gC m^{-2} a^{-1} 的区域位于山东省东北部沿海区域，占比为 22.11%，最大值出现在威海市。鲁中南山地丘陵区 *NPP* 年均值为 250 ~ 300 g C $\cdot m^{-2}$ $\cdot a^{-1}$，主要是由于地形抬升、降水减少（张可欣和孙成武，2009）和气温降低所致；东部沿海大多区域的植被 *NPP* 年均值为 500 ~ 700 g C $\cdot m^{-2}$ $\cdot a^{-1}$，与其海拔较低、气温较高和降水相对丰沛有关。

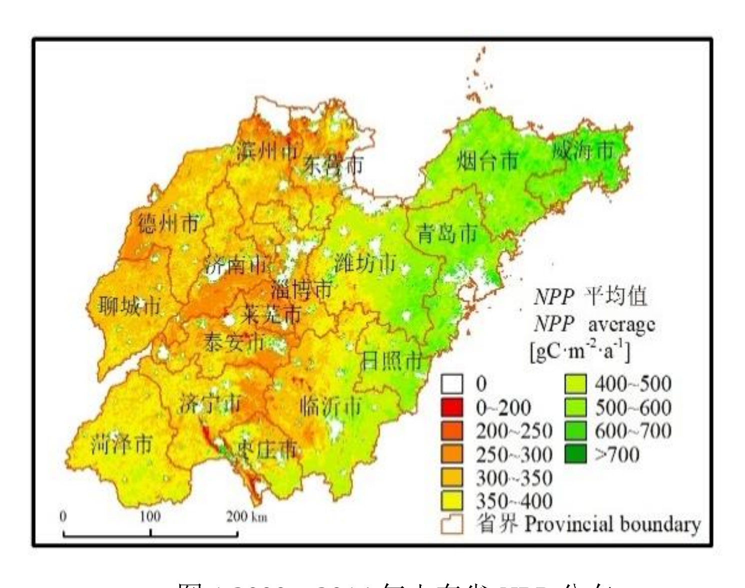


图 1 2000—2014 年山东省 *NPP* 分布

Fig.1 Distribution of *NPP* in Shandong Province from 2000 to 2014

3.2 植被 *NPP* 的时间分布特征

2000—2014 年，山东省植被 *NPP* 总量年平均值为 63.16 T g C，随着时间延续有升有降，2000—2004 年， *NPP* 持续增加（图 2），之后，相对稳定略有升高。2004 年 *NPP* 总量最高，为 70.59 T g C，其次是 2008 年，为 69.74 T g C，两者的 *NPP* 值分别高于平均值的 11.76%和 10.42%；2000 年总量最低，为 53.34 T g C，低于平均值 15.55%；最低值仅是最高值的 0.76 倍，表明山东省植被的 *NPP* 值的年际变化较大、不太稳定。2000—2002 年，植被 *NPP* 值低于 15 年的平均值，主要是由于这些年山东省连续干旱（张胜平等，2004），使部分区域的植被生产力降低（杨晓霞等，2003）。2005 年山东省植被 *NPP* 又下降到 61.79 T g C，可能是由于年初暴风雪天气影响了植被的生长（崔林丽等，2016）。随后几年，植被生产水平逐渐恢复，*NPP* 总量总体略微升高。2009—2011 年植被 *NPP* 总量较低，可能与当时气温与降水都减少有关。如图 3 所示，2009—2011 年研究区平均气温和降水量都呈现减少趋势。

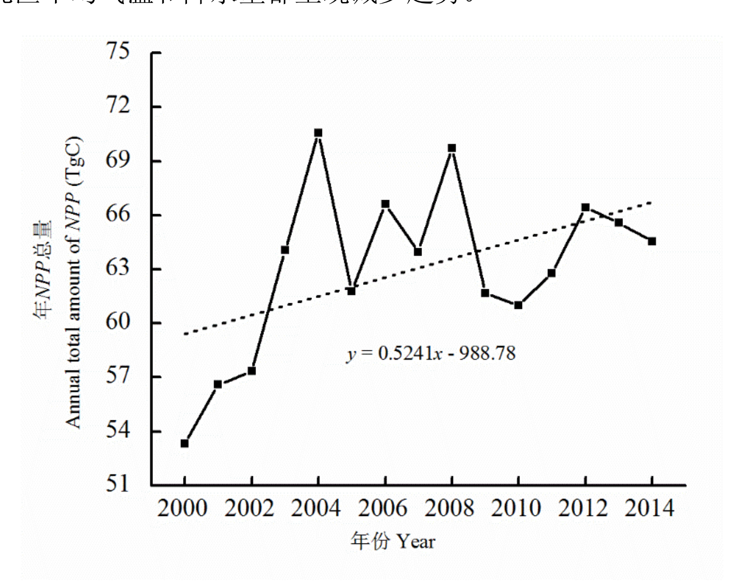
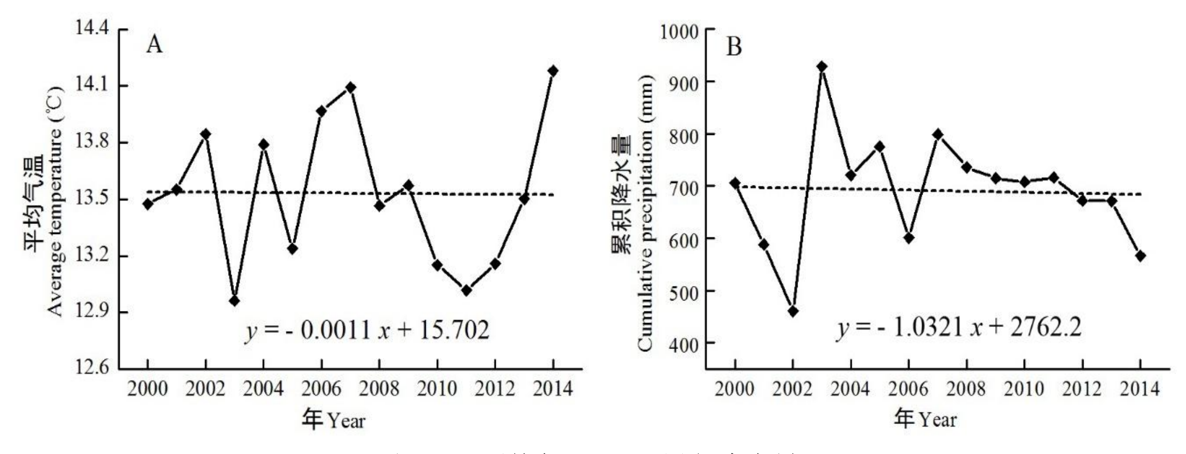


图 2　山东省 2000—2014 年 *NPP* 总量

Fig.2 Total *NPP* in Shandong Province from 2000 to 2014



注：**A**. 平均气温；**B**. 累积降水量。

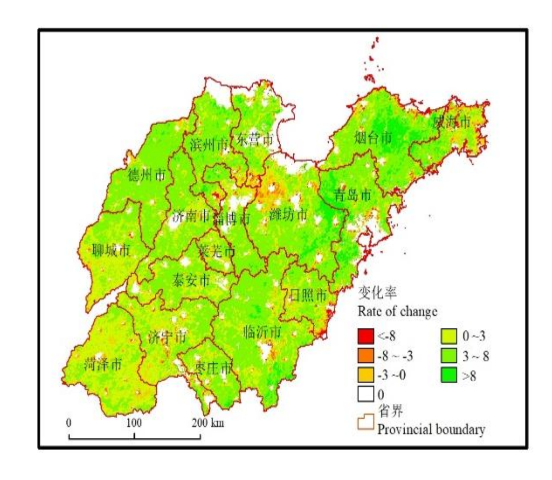
Note: **A**. Average temperature；**B**. Cumulative precipitation.

图 3 2000—2014 年山东省年均气温和年降水量的年际变化

Fig.3 Interannual variation of annual average temperature and annual precipitation in Shandong Province from 2000 to 2014

2000—2014 年，山东省植被 *NPP* 的 *Slope* 平均值为 3.29 g C ·m^{-2} ·a^{-1}。图 4 表明，山东省 92.36%的植被 *NPP* 呈增加趋势，7.64%的植被 *NPP* 为减小趋势。*F* 检验表明，山东省 62.95%的植被 *NPP* 年际变化趋势不明显；*NPP* 年际变化为正值区域（增加趋势）的平均为 3.93 g C ·m^{-2} ·a^{-1}；极显著增加区域占山东省植被面积的的 16.56%，主要分布在烟台市、青岛市、潍坊市、日照市、临沂市、东营市和滨州市；显著增加区域占山东省植被总面积的 19.16%，大部分位于极显著增加区域的周边，少部分在泰安市和德州市；*NPP* 呈现减少趋势的 *Slope* 平均值为-2.80 g C ·m^{-2} ·a^{-1}，其中显著减少和极显著减少的部分仅有 1.33%，零星分布在山东省东南部和北部黄河三角洲地区（图 4）。

山东省不同土地覆盖类型的年际增长速率各不相同，植被 *NPP* 在草地中以 4.69 g C ·m^{-2} ·a^{-1} 的平均速率增长，且增长趋势最明显，其中呈现极显著增加趋势和极显著减少趋势的面积分别占草地总面积的 26.43%和 0.37%; 林地的增长速率为 4.54 g C ·m^{-2} ·a^{-1}, 仅在草地之下，呈极显著增和极显著减的面积分别为 20.38%和 0.25%。耕地、城镇和水域的平均增长速率分别为 3.39、2.37 和 2.60 g C ·m^{-2} ·a^{-1}，相应的极显著增加面积 15.61%、12.17%和 14.77%,极显著减少面积 0.53%、2.54%和 1.11%。而耕地、城镇和水域变化不明显的区域与草地与林地相比相对较多，分别为 64.59%、68.91%和 65.45%，可见，山东省增长速率较明显的草地和林地，其极显著增加区域的面积占比较大，而显示的极显著减少的面积相对较少，无明显变化的区域面积占比小。



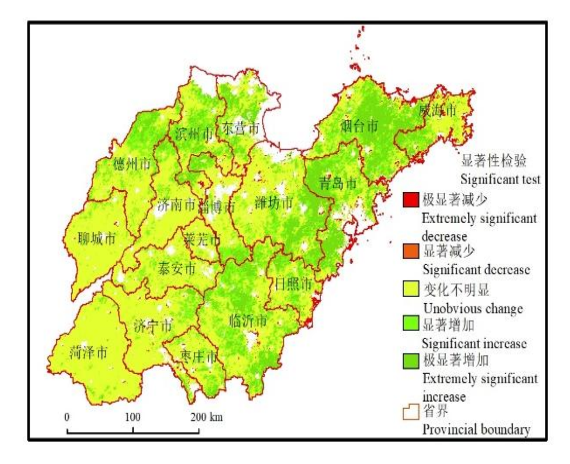


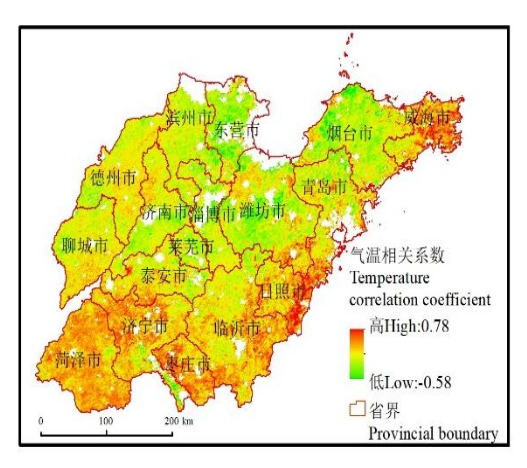
图 4 2000—2014 年山东省 *NPP* 年际变化趋势和显著性分布

Fig.4 Interannual variation trend and significance distribution of *NPP* in Shandong Province during 2000 to 2014

3.3 植被 *NPP* 变化的驱动因素

3.3.1 气象因子对植被 *NPP* 的影响

植被 *NPP* 受气候变化的影响很大，分析气候变化特征有助于进一步探讨植被 *NPP* 的影响因素（Gao et al.，2013）。如图 5，山东省植被 *NPP* 值与年均气温的平均相关系数为 0.09，表现为很弱的正相关关系。正相关区域面积占植被总面积的 70.58%。负相关区域面积占总面积的 29.40%，*T* 检验发现，显著相关（$P < 0.01$）的区域仅有 0.16%，位于日照市的沿海地区。植被 *NPP* 年均值与年降水量平均相关系数为 0.28，较气温与 *NPP* 的相关性略强。正、负相关区面积分别为 91.49%和 8.50%。*T* 检验可知，有 1.49%的区域通过了 $P < 0.01$ 的显著性检验，主要分布在鲁中山地，零散分布在山东省黄河三角洲等地。相比之下，山东省植被 *NPP* 与年均降水量的相关性更强且更显著。



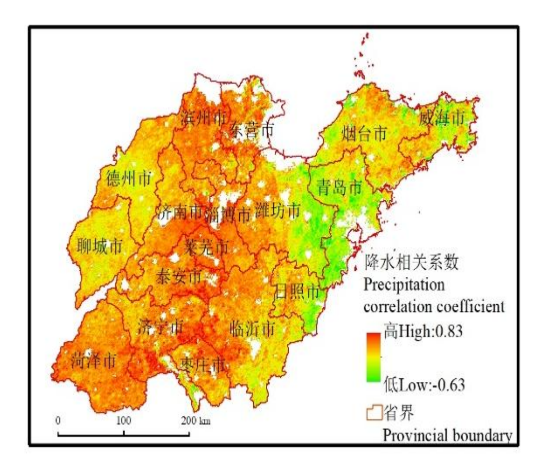
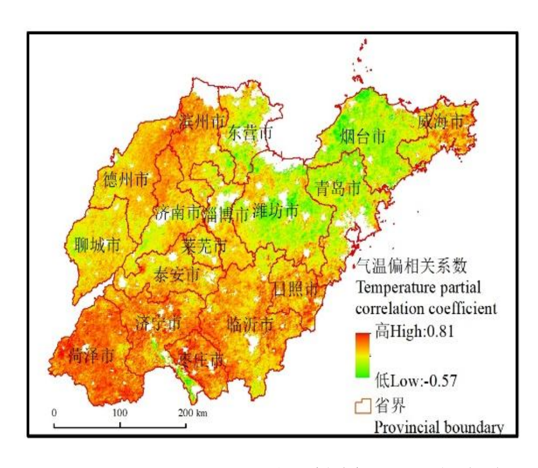


图 5 植被 *NPP* 与气候因素相关系数分布

Fig.5 Distribution of correlation coefficient between vegetation *NPP* and climatic factors

不考虑降水的影响，植被 *NPP* 与温度年均值的平均偏相关系数为 0.24，显著相关区域占 1.00%，比考虑降水影响时的面积占比增大了 0.83%；忽略温度的影响，植被 *NPP* 与年降水量平均值的平均偏相关系数为 0.35，而显著正相关区域占 6.54%，比考虑年均气温影响时的面积占比增加了 5.05%，不显著正相关性区域减少了 3.62%；这说明山东省植被 *NPP* 受水热条件的共同作用，其中降水较气温的影响更重要（图 6）。



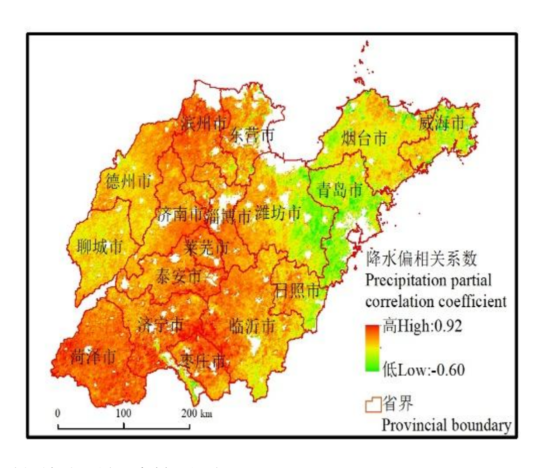


图 6 植被 *NPP* 与气候因素的偏相关系数分布

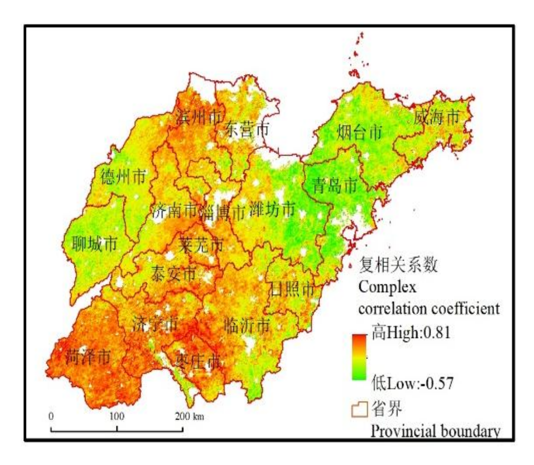
Fig.6 Distribution of partial correlation coefficient between vegetation *NPP* and climatic factors

图 7 可见，复相关关系在 0.003 ~ 0.881 之间。植被 *NPP* 与气候因子复相关性较强的区域分布在菏泽市、济宁市和枣庄市一带，复相关性较弱的区域位于烟台市、青岛市和潍坊市。植被 *NPP* 与气候因子的地

区差异性可能与海拔有关，青岛市、潍坊市和日照市海拔较低，而周边海拔升高，低海拔地区气温较低，使得植被 *NPP* 与气候因子的复相关性较弱。

植被 *NPP* 受气温、降水等气候因子的变化与人类活动因素的影响，降水对其的影响最大，而人类活动中，土地利用类型的转变改变了生态系统的类型和结构，进而改变了植被生产力。

由图 7 驱动类型图可见，山东省面积的 0.56%以气温降水为强驱动力,主要位于在菏泽的西部和枣庄的北部；以气温降水弱驱动的区域大多分布在山东省南部几市，分布较为分散，占总面积的 1.76%；气温驱动型占研究区面积的 0.97%，主要集中在菏泽市和枣庄市；降水驱动型占 5.91%，大致分布于北部的滨州市和东营市，以及南部的泰安市、菏泽市、济宁市与枣庄市的交界处；非气候因子驱动型的面积达到了 90.79%，在山东省各市均有分布。由此可以看出，非气候因子对山东省大多区域内的植被 *NPP* 变化影响较大，是主要的驱动因素。



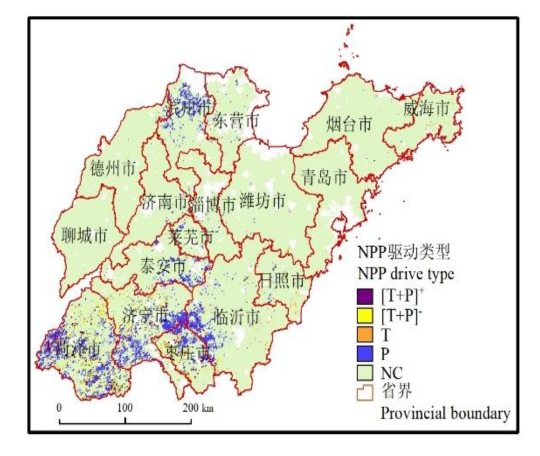


图 7 植被 *NPP* 与气候因素的复相关系数分布

Fig.7 Distribution of complex correlation coefficient between vegetation *NPP* and climatic factors

3.3.2 土地利用变化对植被 *NPP* 的影响

如表 2 所示：2000—2005 年有 3 106 km^2 的土地利用类型发生了转移,占土地利用总面积的 2%，其中耕地转移为最主要的转移类型，转移面积占总转移面积的 51.09%，主要转移为城镇和水域用地。2005—2010 年山东省共有 1 426 km^2 的土地向其他土地类型发生了转移，占总面积的 0.92%，耕地转移面积占总转移面积的 70.48%，主要向城镇用地转移。山东省近十年主要在耕地与城镇、未利用地与城镇之间土地类型发生转移，主要是以耕地、林地、草地和未利用地转出，以及城镇和水域用地转入为主的土地类型转移。

表 2 土地面积转移矩阵

Table 2 Transfer matrix of land area (km^2)

年份 Year	土地利用类型 Land use type	耕地 Farmland	林地 Forest	草地 Grassland	水域 Water area	城镇 Urban area	未利用土地 Unused land
2000—2005	耕地 Farmland	101 896	13	0	313	1 248	13
	林地 Forest	4	9 736	0	12	27	0
	草地 Grassland	481	17	13 163	109	81	26
	水域 Water area	58	3	49	5 641	146	14
	城镇 Urban area	18	0	2	11	19 953	1
	未利用土地	185	1	3	44	227	1 834

	Unused land						
2005—2010	耕地 Farmland	101 637	10	0	106	882	7
	林地 Forest	1	9 750	1	2	16	0
	草地 Grassland	3	0	13 149	15	44	6
	水域 Water area	16	0	0	6 007	92	14
	城镇 Urban area	6	0	0	42	21 631	7
	未利用土地 Unused land	16	0	0	20	111	1 741

不同的土地利用类型产生的 *NPP* 各有不同。不同土地利用类型间植被 *NPP* 的转移主要表现为：具有较高植被 *NPP* 的土地覆盖类型向较低 *NPP* 的的土地覆盖类型的转换，使得植被 *NPP* 损失；或是植被 *NPP* 较低的土地覆盖类型向较高的的转换，使得植被 *NPP* 增加（王芳等，2018）。2000—2010 年，不同土地利用类型的转换使得山东省植被 *NPP* 转移的情况如表 3 所示:

表 3 *NPP* 转移矩阵

Table 3 *NPP* transfer matrix（$\times10^{-4}$ T g C）

年份 Year	土地利用类型 Land use type	耕地 Farmland	林地 Forest	草地 Grassland	水域 Water area	城镇 Urban area	未利用土地 Unused land
2000—2005	耕地 Farmland	*	7.53	0	57.67	-156.69	6.31
	林地 Forest	1.87	*	0	1.05	-6.77	0
	草地 Grassland	272.28	1.19	*	9.90	-12.09	6.73
	水域 Water area	24.07	0	0	*	2.00	1.31
	城镇 Urban area	13.90	0	1.07	4.36	*	0.42
	未利用土地 Unused land	114.42	0	0.16	3.44	2.18	*
2005—2010	耕地 Farmland	*	4.36	0	15.52	-207.76	0.16
	林地 Forest	-0.03	*	0.43	0.95	-2.75	0
	草地 Grassland	-0.23	0	*	-2.70	-4.51	0.05
	水域 Water area	0.89	0	0	*	-1.81	0.92
	城镇 Urban area	23.66	0	0	21.17	*	0

未利用土地 Unused land	-0.66	0	0	-0.43	0.43	*

注："*"代表该方式下不转换。

Note："*" means no conversion in this mode.

2000—2005 年，草地和未利用地转移为耕地使得 *NPP* 增加量最大，为 386.7×10^{-4} T g C；耕地转移为城镇用地使植被 *NPP* 减少 156.69×10^{-4} T g C；各土地覆盖类型植被 *NPP* 向草地转移的 *NPP* 量最少，仅有 1.23×10^{-4} T g C，其次为林地，为 8.72×10^{-4} T g C，耕地最多，有 426.54×10^{-4} T g C。

2005—2010 年，城镇向耕地和水域用地的转换，使得植被 *NPP* 增加量最大，为 44.84×10^{-4} T g C；耕地向林地和水域的转换，也使植被 *NPP* 有所增加；耕地转移城镇导致植被 *NPP* 损失最大，损失量为 207.76×10^{-4} T g C，林地转移城镇、草地转为城镇也带来了 *NPP* 的损失。各类型土地类型植被 *NPP* 向城镇转移，损失的 *NPP* 量最多，共损失了 216.83×10^{-4} T g C，因为城市面积的不断增加，植被面积不断减少，城市的植被 *NPP* 有较大的损失。这表明引起植被 *NPP* 损失的主要驱动力是城市化。

2000—2005 年草地向耕地转移土地面积 481 km^2，使得 *NPP* 增加了 272.28×10^{-4} T g C，而之后的五年间仅有 3 km^2 的草地转移为耕地，远远小于 2000—2005 年转移的面积，可能由于转移的土地并未得到充分的耕作，未能很好的利用，原本的草地荒废，使得转移为耕地的土地 *NPP* 不升反降，导致了两个研究时间段相同转移类型损益不同。山东省拥有众多的湖泊湿地资源，随着退耕还湿还湖工程的实施，众多人工和自然湖泊湿地的情况得到进一步恢复，水域中的芦苇、蒲草等繁殖能力强的植物，形成大范围的植物群落（刘颖，2017），良好的植物多样性使得水域植被的净初级生产力较之周边耕地、草地的高，湖泊湿地等水域植被生长状况得到进一步的改善。此外，2005 年山东省政府下发了基本农田保护工作的意见，即保护了作物的生长力，同时有效防止了耕地城镇化。2008 年政府下发胶东半岛城市群和省会城市群一体发展规划的通知，在经济发展的情况下，优先发展主城区，设立农田保护区、水源保护区和生态自然保护区等，因地制宜，为生态系统的良性发展提供保障。

4 讨论与结论

研究表明，气候因素和人为因素等共同影响着植被 *NPP* 的空间变化，面积分别占研究区的 9.21%和 90.79%，说明人为因素更大程度的影响着山东省的植被 *NPP*。对人类活动的分析利用了土地覆盖类型转移的方法，其中城市面积的增加为引起植被 *NPP* 损失的主要因素。文中非气候因子驱动型面积达到 90.79%，人类活动导致的土地利用类型转移只是其中一部分的原因，2000—2005 年和 2005—2010 年的土地转移面积分别只有 2%和 0.92%。人类活动所诱发的自然灾害、大型工程建设等因素也会影响植被 *NPP* 的变化。研究区海拔、坡度的不同，使得气候条件不尽相同，不同海拔和坡度所适应的植被类型、土壤肥力的差别，也会影响到植被 *NPP* 的大小，这些因素在今后的研究中会进一步讨论分析。

人类活动对植被 *NPP* 有负面减损和正面增多的双重作用。如城市化进程的加快导致对植被的破坏等因素为负面作用，2000—2010 年，山东省城市面积增加了 2 787 km^2，城市面积增加导致损失的 *NPP* 共有 323.21×10^{-4} T g C；而加大对农田保护的投入力度，加强农田水利基本建设等措施为正面影响，这十年间耕地面积增加了 788 km^2，增加的耕地 *NPP* 共有 177.27×10^{-4} T g C，其中未利用地和草地向耕地的转移，以及耕地自身生产力的提高使得耕地 *NPP* 总量增加。

本研究中，山东省植被 *NPP* 整体为增加趋势，植被状态好转，与国内学者的研究结果相同，苏本营等（2010）对山东省农田生态系统的研究发现，2000—2006 年农田生态系统在呈现好转的趋势。然而崔林丽等（2016）在中国东南部植被 *NPP* 时空格局变化的研究中发现 2001—2010 年东南部植被 *NPP* 整体上是微弱的减少趋势。由于植被类型、地形地貌和人为干预等因素，使得不同区域尺度的植被 *NPP* 存在明显差异。研究中使用的 *NPP* 数据分辨率较低，无法精确的区分不同植被类型，分析中可能会带来结果的误差，在今后的研究中应运用更高分辨率的数据；牛忠恩等（2016）提出 MOD17 产品中的光能利用率导致其植被 *NPP* 被低估，在今后的研究中应结合研究区实际情况，具体参数做适当的调整，并结合多种 *NPP* 计算方法，提

高更适用于区域研究的模型精度。

综上所述，结论如下：

（1）2000—2014 年，山东省 *NPP* 年均值为 442 gC m^{-2} a^{-1}，15 年间 *NPP* 总量平均为 63.16 T g C，呈现先增加，后相对稳定略有升高的趋势。

（2）山东省植被 *NPP* 年均值呈现明显的空间分异特征。低值区集中于济南市、淄博市、莱芜市、泰安市和济宁市，德州市西南部、滨州市和东营市北部地区也有分布；高值区位于东北沿海区域，最大值在威海市。

（3）山东省 *NPP* 增加的区域占总面积的 92.36%，减少区域占比为 7.64%。*NPP* 极显著减少和显著减少的面积合计仅有 1.33%，变化不明显区域为 62.95%，显著增加区域 19.16%，极显著增加区域占 16.56%。

（4）植被 *NPP* 变化的主要驱动因素是气候变化和人类活动。人类活动的影响最大，占研究区总面积的 90.79%，城市面积的增多是主要影响 *NPP* 变化的因素，主要体现在土地利用面积中耕地向城市的转移损失了 *NPP*。山东省植被 *NPP* 受气候因子的影响面积占 9.21%，其中降水是主要的影响因素。

参考文献:

CHENG CX, XU ZX, WANG ZH, et al.，2014. Temporal-spatial change simulation and analysis of net primary productivity in northeast China from 2001 to 2010[J]. Resour Sci, 36(11): 2401-2412. [程春晓，徐宗学，王志慧，等，2014. 2001-2010 年东北三省植被净初级生产力模拟与时空变化分析[J]. 资源科学，36(11)：2401-2412.]

CHEN YH, LI XB, SHI PJ, 2001. Variation in NDVI driven by climate factors across China, 1983—1992[J]. Chin J Plant Ecol, 25(6): 716-720. [陈云浩，李晓兵，史培军，2001. 1983—1992 年中国陆地 NDVI 变化的气候因子驱动分析[J]. 植物生态学报，25(6)：716-720.]

CHEN YY, CHEN W, WU W, et al.，2015. Temporal and spatial variation of vegetation *NPP* and its response to climate factors in southern China[J]. J Yangzhou Univ (Agric Life Sci), 36(3): 104-110. [陈瑛瑛，陈雯，武威，等，2015. 中国南方植被 *NPP* 时空变化及其对气候因子的响应[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版)，36(3)：104-110.]

CRAMER W, KICKLIGHTER DW, BONDEAU A, et al.，1999. Composing global models of terrestrial net primary productivity(*NPP*): Overview and key results [J]. Global Change Biol, 5(Suppl. 1): 1-15.

CUI LL, DU HQ, SHI J, et al.，2016. Spatial and temporal pattern of vegetation *NPP* and its relationship with climate in the Southeastern China[J]. Sci Geogr Sin, 36(5): 787-793. [崔林丽，杜华强，史军，等，2016. 中国东南部植被 *NPP* 的时空格局变化及其与气候的关系研究[J]. 地理科学，36(5)：787-793.]

FIELD CB, BEHRENFELD MJ, RANDERSON JT, et al.，1998. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components [J]. Science, 281(5374): 237-240.

GAO YH, ZHOU X, WANG Q, et al.，2013. Vegetation net primary productivity and its response to climate change during 2001-2008 in the Tibetan Plateau [J]. Sci Total Environ, 444(1): 356-362.

GAO ZQ, LIU JY, CAO MK, et al.，2004. Impacts of land use and climate change on regional net primary productivity[J]. J Geogr Sci, 59(4): 581-591. [高志强，刘纪远，曹明奎，等，2004. 土地利用和气候变化对区域净初级生产力的影响[J]. 地理学报，59(4)：581-591.]

GUO ZX, WANG ZM, LIU DW, et al.，2009. Analysis of temporal and spatial features of farmland productivity in the Sanjiang Plain[J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 25(1): 249-254. [国志兴，王宗明，刘殿伟，等，2009. 三江平原农田生产力时空特征分析[J]. 农业工程学报，25(1)：249-254.]

HE YX, YI GH, ZHANG TB, et al ，2018. The EVI trends and driving factors in Red River Basin affected by the “corridor-barrier” function during 2000—2014[J]. Acta Ecol Sin, 38(06): 2056-2064. [何奕萱，易桂花，张廷斌，等，2018. 红河流域“通道-阻隔”作用下 2000—2014 年植被 EVI 变化趋势与驱动力[J]. 生态学报，38(06)：2056-2064.]

LI DK, WANG Z, 2018. The characteristics of *NPP* of terrestrial vegetation in China based on MOD17A3 data[J]. Ecol Environ Sci, 27(03): 397-405. [李登科， 王钊， 2018. 基于 MOD17A3 的中国陆地植被 *NPP* 变化特征分析[J]. 生态环境学报，27(03)：397-405.]

LIU Y, 2017. The pattern of plant diversity and primary productivity of lakeshore in Nansi Lake[C]. Shandong: Shandong University: 1-64.[刘颖，2017. 南四湖湖滨带植物多样性格局及初级生产力[C]. 山东：山东大学：1-64.]

NIU ZE, YAN HM, CHEN JQ, et al.， 2016. Comparison of crop gross primary productivity estimated with VPM model and MOD17 product in field ecosystem of China[J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 32(4): 191-198. [牛忠恩，闫慧敏，陈静清，等，2016. 基于 VPM 与 MOD17 产品的中国农田生态系统总初级生产力估算比较[J]. 农业工程学报，32(4)：191-198.]

PAN JH, LI Z, 2015. Temporal-spatial change of vegetation net primary productivity in the arid region of northwest China during 2001 and 2012[J]. Chin J Ecol, 34(12): 3333-3340. [潘竟虎， 李真， 2015. 2001-2012 年西北干旱区植被净初级生产力时空变化[J]. 生态学杂志，34(12)：3333-3340.]

RASMUS F, INGE S, MICHAEL SR, et al.， 2006. Evaluation of satellite based primary production modelling in the semi-arid Sahel [J]. Remote Sensing Environ, 105(3): 173-188.

SU BY, ZHANG L, CHEN SB, et al.， 2010. The spatial and temporal patterns of net primary productivity and its impact factors in regional agro-ecosystem: A case study in Shandong Province[J]. Ecol Environ Sci, 19(9): 2036-2041. [苏本营，张璐，陈圣宾，等，2010. 区域农田生态系统生产力的时空格局及其影响因子研究—以山东省为例[J]. 生态环境学报，19(9)：2036-2041.]

WANG F, WANG Z, ZHANG Y, 2018. Spatio-temporal variations in vegetation net primary productivity and their driving factors in Anhui Province from 2000 to 2015[J]. Acta Ecol Sin, 38(8): 2754-2767. [王芳，汪左，张运，2018. 2000-2015 年安徽省植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素[J]. 生态学报，38(8)：2754-2767.]

WANG ZH, REN JT, DAI HY, et al.， 2018. Temporal-spatial variation of Vegetation Productivity in Guizhou: a case study in Weining County[J]. Environ Sci Technol, 41(09): 200-205. [王志红，任金铜，戴华阳，等，2018. 贵州植被生产力时空变化分析:以威宁县为例[J]. 环境科学与技术，41(09)：200-205.]

WEI HJ, ZHANG YF, ZHU N, et al.，2014. Temporal-spatial changes of farmland productivity in Henan Province using MODIS data[J]. Sci Surv Mapp, 39(11): 67-7. [位贺杰，张艳芳，朱妮，等，2014. 河南农田生产力时空变化的遥感分析[J]. 测绘科学，39(11)：67-71.]

YANG XX, LI YH, LI CY, et al.， 2003. Weather forecast techonology research for guidance in Shandong Province[J]. Meteorology, 29(11): 3-7. [杨晓霞，李玉华，李昌义，等，2003. 山东省天气预报逐级指导技术研究[J]. 气象，29(11)；3-7.]

ZHANG J, PAN XL, 2010. Spatial pattern and seasonal dynamics of net primary productivity in mountain-oasis-desert ecosystem on the north piedmont of Tianshan Mountains in arid north-west China[J]. Arid Land Geogr, 33(01): 78-86. [张杰，潘晓玲，2010. 天山北麓山地-绿洲-荒漠生态系统净初级生产力空间分布格局及其季节变化[J]. 干旱区地理，33(01)：78-86.]

ZHANG KX, SUN CW, 2009. Sensitivity experiment for the impact of mountainous topographic of middle Shandong Province to regional climate[J]. Chin J Agrometeorol, 30(4): 496-500+508. [张可欣，孙成武，2009. 鲁中山区地形对山东区域气候影响的敏感性试验[J]. 中国农业气象，30(4)：496-500+508.]

ZHANG SP, CHEN XC, SU CB, et al.，2004. Analysis of severe drought in Shandong Province in 2002[J]. Hydrol, 24(3): 42-45. [张胜平，陈希村，苏传宝，等，2004. 2002 年山东省严重干旱分析[J]. 水文, 24(3)：42-45.]

ZHONG XC, CHEN W, LIU T, et al.， 2016. Spatial and temporal change of vegetation Net Primary Productivity and its relationship with climate from 2001 to 2010 in China[J]. Chin J Agr Resour Reg Plann, 37(9): 16-22. [仲晓春，陈雯，刘涛，等，2016. 2001-2010 年中国植被 *NPP* 的时空变化及其与气候的关系[J]. 中国农业资源与区划，37(9)：16-22.]